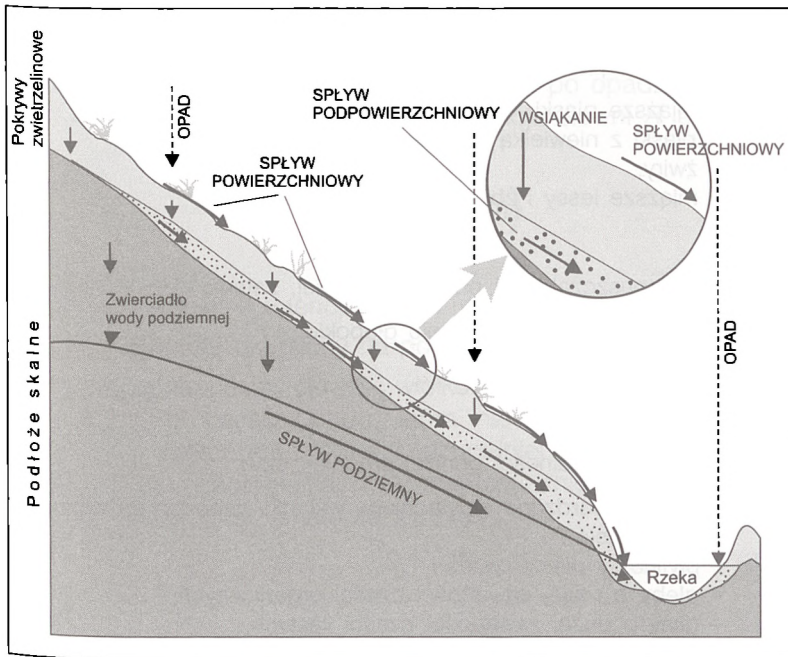


## 3.2. OPAD EFEKTYWNY

Woda opadowa, po dotarciu do powierzchni terenu, może gromadzić się na jego powierzchni albo spływać zgodnie z nachyleniem terenu lub wsiąkać zasilając wody gruntowe. Część wód opadowych może się także przemieszczać w przypowierzchniowej warstwie gruntu w obrębie utworów pokrywowych formując spływ podpowierzchniowy (śródpokrywowy) (ryc. 3.2.1). Od tego, jaka część wody opadowej dotrze do koryta rzecznego, zależy kształt **hydrogramu odpływu**. Jeśli całość opadu wsiąknie, zasilając wody gruntowe, reakcja rzeki jest niezauważalna lub jest widoczna z pewnym opóźnieniem. Jeśli woda opadowa formuje spływ powierzchniowy lub śródpokrywowy, przepływ w rzece zaczyna się zwiększać.

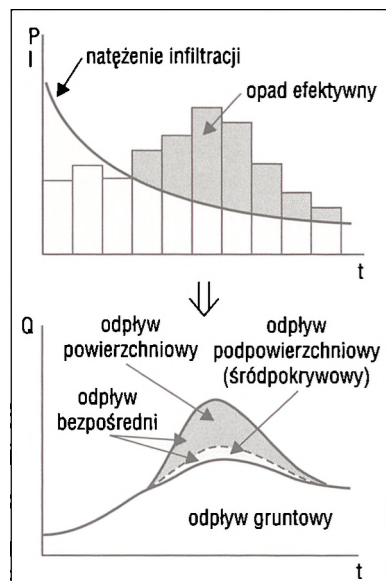


Spływ powierzchniowy formuje się zwykle podczas deszczów nawałnych



Ryc. 3.2.1. Formy zasilania rzeki (Chelmicki, 2001)

**Spływ powierzchniowy** pojawia się zazwyczaj podczas nawałnych opadów deszczu, deszczów rozlewnych lub intensywnego tajania pokrywy śnieżnej (patrz rozdz. 1.1). Sprzyja mu obecność utworów nieprzepuszczalnych. Może jednak występować także na utworach przepuszczalnych, ale tylko wtedy, gdy podłoże zostanie wcześniej w pełni nasycone wilgocią (tzw. straty początkowe) lub gdy natężenie opadu przewyższa natężenie infiltracji. **Spływ śródpokrywowy** zachodzi płytko pod powierzchnią gruntu i obejmuje



Ryc. 3.2.2. Opad efektywny i odpowiadający mu hydrogram odpływu

część wody opadowej, która dostała się do profilu glebowego i prze-mieszcza się w górnej warstwie strefy aeracji w kierunku koryta rzecznej. Suma odpływu powierzchniowego i podpowierzchniowego określana jest jako **odpływ bezpośredni**. Ten opad, który ulega transformacji w spływ powierzchniowy lub śródpokrywowy i dostaje się do koryta, powodując wzrost stanu wody w rzece, nazwany jest **opadem efektywnym** lub skutecznym (ryc. 3.2.2). Znajomość wielkości opadu efektywnego jest szczególnie przydatna w modelowaniu transformacji opadu w odpływ.

Do wyznaczenia wielkości opadu efektywnego służy opracowana w USA **metoda SCS** (*Soil Conservation Service*), w której opad efektywny uzależniony jest od rodzaju gleb, struktury użytkowania ziemi, charakteru pokrywy roślinnej oraz stanu uwilgotnienia zlewni przed wystąpieniem opadu. W pierwszym etapie należy określić rodzaj gleb występujących na obszarze zlewni. Gleby podzielone są na cztery grupy: A, B, C, D:

#### Grupa A.

Gleby o dużej przepuszczalności, na których prawie nie występuje zjawisko spływu powierzchniowego. Do tej grupy zalicza się:

- miększe piaski,
- piaski z niewielką domieszką gliny,
- żwiry,
- miększe lessy i zbite muły.

#### Grupa B.

Gleby o przepuszczalności powyżej średniej, zatem:

- gleby piaszczyste średnio głębokie,
- płytkie lessy,
- ły piaszczyste.

#### Grupa C.

Gleby o przepuszczalności poniżej średniej, czyli:

- gleby utwardzone, posiadające wkładki słabo przepuszczalne,
- ły gliniaste,
- płytkie ły piaszczyste,
- gleby o małej zawartości części organicznych,
- gliny o dużej zawartości części ilastych.

#### Grupa D.

Gleby o małej przepuszczalności, ułatwiające powstawanie spływu powierzchniowego. Do tej grupy zalicza się:

- gleby silnie pylaste,
- gliny zasolone,
- gleby uwarstwione z wkładkami nieprzepuszczalnymi.



Pomiary spływu śródpokrywowego w zlewni eksperymentalnej (zlewnia Dworskiego Potoku, Pogórze Wiśnickie)

Po określeniu grupy glebowej, wyznacza się **parametr CN** (tab. 3.2.1). Parametr CN przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 100. Przy  $CN = 0$  istnieje nieograniczona chłonność zlewni (możliwości

infiltracji) i opad efektywny nie wytworzy się. Jeśli  $CN = 100$ , istnieje stan pełnego uwilgotnienia zlewni i opad efektywny równa się opadowi całkowitemu. Czynnikiem decydującym o zmianach parametru  $CN$  jest **stan uwilgotnienia zlewni**. Jest on wyrażany przez sumę opadów z 5 dni poprzedzających opad wywołujący wezbranie. Poziom uwilgotnienia zlewni poza okresem wegetacyjnym jest uznany za przeciętny (tj. poziom II) wtedy, jeśli suma opadów z 5 dni przed wystąpieniem opadu ( $P_5$ ) mieści się w przedziale:  $13 \text{ mm} \leq P_5 < 28 \text{ mm}$ , natomiast w okresie wegetacyjnym w przedziale:  $35 \text{ mm} \leq P_5 < 53 \text{ mm}$ .

Zdarza się jednak, iż przed wystąpieniem opadu, stan uwilgotnienia zlewni nie odpowiada poziomowi przeciętnemu. Należy wówczas skorygować parametr  $CN$  w nawiązaniu do aktualnego poziomu uwilgotnienia (poziom I lub III, tab. 3.2.2, 3.2.3). Poziom I odpowiada niskiemu uwilgotnieniu zlewni, przez co możliwość pojawienia się spływu powierzchniowego jest niewielka, natomiast poziom III odpowiada wysokiemu uwilgotnieniu, występującemu zwykle po opadach burzowych lub rozlewnych.

Na kolejnym etapie należy wyznaczyć **potencjalną retencję zlewni**  $R$ , tzn. maksymalną wartość retencji po opadzie o bardzo długim czasie trwania. Potencjalna retencja zlewni  $R$  jest funkcją parametru  $CN$ :

$$R = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.2.1)$$

gdzie:

$R$  – potencjalna retencja zlewni [mm],

$CN$  – parametr określony na podstawie tab. 3.2.1 i 3.2.3.

Następnie należy określić wielkości **strat początkowych**  $S_p$ , stanowiących tę część opadu, która nie dostała się do koryta z powodu intercepcji, infiltracji, uzupełnienia wilgotności gleby, zatrzymania w zagłębieniach. Są one uzależnione od potencjalnej retencji zlewni, gdyż stanowią jej część:

$$S_p = \mu R \quad (3.2.2)$$

gdzie:

$S_p$  – straty początkowe [mm],

$\mu$  – współczynnik empiryczny (tab. 3.2.4),

$R$  – potencjalna retencja zlewni [mm].

Wyznaczając **skumulowany opad efektywny**  $P_e(t)$  metodą SCS, zakłada się, że stosunek skumulowanej infiltracji  $F(t)$ , rozumianej jako ilość wody, która infiltrowała – od momentu wystąpienia opadu efektywnego do danej chwili – do potencjalnej retencji zlewni  $R$ , jest równy stosunkowi skumulowanego opadu efektywnego  $P_e(t)$  do skumulowanego opadu potencjalnego, będącego różnicą skumulowanego opadu całkowitego  $P(t)$  i strat początkowych  $S_p$ :



Bruzdy i drogi polne przyczyniają się do intensyfikacji spływu powierzchniowego

Tab. 3.2.1. Wartości parametru CN przy przeciętnym uwilgotnieniu zlewni (Ozga-Zielińska, Brzeziński; 1994)

Opis terenu	Sposób uprawy	Warunki hydrologiczne	Wartości CN dla grup glebowych			
			A	B	C	D
Ugór Rośliny okopowe	uprawy rzędowe <sup>a</sup>	złe	77	86	91	94
		dobre	72	81	88	91
	uprawy rzędowe <sup>b</sup> wzdłuż warstw tarasowanie	złe	67	78	85	89
		dobre	70	79	84	88
		złe	65	75	82	86
		dobre	66	74	80	82
Rośliny zbożowe	uprawy rzędowe	złe	62	71	82	81
		dobre	65	76	84	88
	uprawy rzędowe wzdłuż warstw tarasowanie	dobre	63	75	83	87
		złe	63	74	82	85
		dobre	61	73	81	84
		złe	61	72	79	82
Rośliny motylkowe	uprawy rzędowe	dobre	59	70	78	81
		złe	66	77	85	89
	uprawy rzędowe wzdłuż warstw tarasowanie	dobre	58	72	81	85
		złe	63	74	82	85
		dobre	58	72	81	85
		złe	64	75	83	85
Pastwiska	uprawy rzędowe	dobre	55	69	78	83
		złe	63	73	80	83
	uprawy rzędowe wzdłuż warstw tarasowanie	dobre	51	67	76	70
		złe	68	79	86	89
		średnie	49	69	78	84
		dobre	39	61	74	80
Lasy	uprawy rzędowe	złe	45	66	77	83
		średnie	36	60	73	79
	uprawy rzędowe wzdłuż warstw tarasowanie	dobre	25	55	70	77
		złe	30	58	71	78
		dobre	59	74	82	86
		złe	72	82	87	89
Łąki	—	dobre	74	84	90	92
Zabudowa gospodarstw	—	—	—	—	—	—
Drogi gruntowe	—	—	—	—	—	—
Drogi z twardą nawierzchnią	—	—	—	—	—	—
Otwarte przestrzenie, polany, parki, tereny golfowe, cmentarze itp. ≥ 75% powierzchni trawiastej	—	—	39	61	74	80
50–75% powierzchni trawiastej	—	—	49	69	79	84
Tereny handlowe i prze- mysłowe 85% powierz- chni nieprzepuszczalnej	—	—	89	92	94	95
Okręgi przemysłowe 72% powierzchni nieprzepuszczalnej	—	—	81	88	91	93
Tereny zamieszkałe (przeciętna wielkość obszaru lub procent nieprzepuszczalności)	—	—	—	—	—	—
≤ 500 m <sup>2</sup> 65%	—	—	77	85	90	92
1000 m <sup>2</sup> 38%	—	—	61	75	83	87

Opis terenu	Sposób uprawy	Warunki hydrologiczne	Wartości CN dla grup glebowych			
			A	B	C	D
1700 m <sup>2</sup> 30%	-	-	57	72	81	86
2000 m <sup>2</sup> 25%			54	70	80	85
4000 m <sup>2</sup> 20%			51	68	79	84
Ulice i drogi utwardzone z krawężnikiem i kanalizacją deszczową			98	98	98	98
żwirowe			76	85	89	91
blotniste			72	82	87	89

<sup>a</sup> – uprawy rzędowe – kierunek orki niezależny od spadku zbocza; <sup>b</sup> – uprawy rzędowe wzdłuż warstw – orka równoległa do warstw

Poziom uwilgotnienia zlewni	Suma opadów z 5 dni poprzedzających [mm]	
	Okres pozawegetacyjny	Okres wegetacyjny
I	$P_5 < 13$	$P_5 < 35$
II	$13 \leq P_5 < 28$	$35 \leq P_5 < 53$
III	$28 \leq P_5$	$53 \leq P_5$

Tab. 3.2.2. Poziom uwilgotnienia zlewni na podstawie sumy opadów  $P_5$  z 5 dni poprzedzających wystąpienie danego opadu (Ozga-Zielińska, Brzeziński; 1994)

Tab. 3.2.3. Wartości parametru CN dla trzech poziomów (I, II, III) uwilgotnienia zlewni (Ozga-Zielińska, Brzeziński; 1994)

CN dla II poziomu (z tab. 3.2.1)	CN dla poziomów:		CN dla poziomu II (z tab. 3.2.1)	CN dla poziomów:		CN dla poziomu II (z tab. 3.2.1)	CN dla poziomów:	
	I	III		I	III		I	III
100	100	100	72	53	86	44	25	64
98	94	99	70	51	85	42	24	62
96	89	99	68	48	84	40	22	60
94	85	98	66	46	82	38	21	58
92	81	97	64	44	81	36	19	56
90	78	96	62	42	79	34	18	54
88	75	95	60	40	78	32	16	52
86	72	94	58	38	76	30	15	50
84	68	93	56	36	75	25	12	43
82	66	92	54	34	73	20	9	37
80	63	91	52	32	71	15	6	30
78	60	90	50	31	70	10	4	22
76	58	89	48	29	68	5	2	13
74	55	88	46	27	66	0	0	0

Tab. 3.2.4. Wartości współczynnika  $\mu$  do obliczania strat początkowych  $S_p$  (Ozga-Zielińska, Brzeziński; 1994)

CN	$\mu$
$CN < 70$	0,075
$70 \leq CN < 80$	0,100
$80 \leq CN < 90$	0,150
$90 \leq CN$	0,200

$$\frac{F(t)}{R} = \frac{P_e(t)}{P(t) - S_p} \quad (3.2.3)$$

gdzie:

- $F(t)$  – skumulowana infiltracja [mm],  
 $R$  – potencjalna retencja zlewni [mm],  
 $P_e(t)$  – skumulowany opad efektywny [mm],  
 $P(t)$  – skumulowany opad całkowity [mm],  
 $S_p$  – straty początkowe [mm].

**Skumulowana infiltracja**  $F(t)$  jest to różnica pomiędzy skumulowanym opadem całkowitym a skumulowanym opadem efektywnym i stratami początkowymi:

$$F(t) = P(t) - S_p - P_e(t) \quad (3.2.4)$$

gdzie:

- $F(t)$  – skumulowana infiltracja [mm],  
 $P(t)$  – skumulowany opad całkowity [mm],  
 $S_p$  – straty początkowe [mm],  
 $P_e(t)$  – skumulowany opad efektywny [mm].

Aby obliczyć skumulowany opad efektywny  $P_e(t)$  w dowolnej chwili, należy wzór 3.2.4 podstawić do wzoru 3.2.3 i odpowiednio przekształcić:

$$P_e(t) = \frac{(P(t) - S_p)^2}{P(t) - S_p + R} \quad (3.2.5)$$

gdzie:

- $P_e(t)$  – skumulowany opad efektywny [mm],  
 $P(t)$  – skumulowany opad całkowity [mm],  
 $S_p$  – straty początkowe [mm],  
 $R$  – potencjalna retencja zlewni [mm].

Jeśli straty początkowe  $S_p$  są większe lub równe opadowi całkowitemu  $P(t)$ , wówczas opad efektywny  $P_e(t)$  jest równy 0, co oznacza brak odpływu bezpośredniego.

Aby obliczyć **natężenie opadu efektywnego**  $I_e$  w kolejnych krokach czasowych  $\Delta t$  (np. co godzinę), co jest szczególnie przydatne jako wejście w modelach odpływu, należy zastosować wzór:

$$I_e(i) = P_e(i \Delta t) - P_e \frac{(i-1)\Delta t}{\Delta t} \quad (3.2.6)$$

gdzie:

- $I_e$  – natężenie opadu efektywnego [ $\text{mm} \cdot \text{godz.}^{-1}$ ]  
 $\Delta t$  – przyjęty krok czasowy [godz.].

**natężenie opadu** – stosunek sumy do czasu trwania opadów



$P_e(t)$  – skumulowany opad efektywny obliczony według wzoru (3.2.5) [mm],

$i$  – kolejne przedziały czasowe.

Najważniejszą rolę w formowaniu opadu efektywnego odgrywa proces infiltracji. Wiele zmian użytkowania terenu polegających m.in. na wzroście powierzchni nieprzepuszczalnych lub słabo przepuszczalnych (np. urbanizacja, ugorowania gruntów) powoduje zwiększenie opadu efektywnego. Powoduje to zarówno wzrost objętości, jak i zmiany przebiegu wezbrań.

## Przykład

Wyznacz wartość opadu efektywnego po siódmej godzinie występowania opadu deszczu w okresie pozavegetacyjnym, w zlewni o powierzchni 150 km<sup>2</sup>, przy założeniach:

- 60% powierzchni zlewni pokryte jest płytkimi łąkami piaszczystymi, na których uprawia się ziemniaki (orka wzdłuż warstwic),
- 40% powierzchni zlewni pokryte jest utworami piaszczystymi zajętymi przez łąki,
- sumy opadów w kolejnych godzinach wynosiły: 4 mm, 3 mm, 6 mm, 3 mm, 4 mm, 7 mm, 6 mm, 8 mm, 6 mm, 4 mm.

W zlewni panuje przeciętny poziom uwilgotnienia.

## Rozwiązanie

### 1. Wyznaczenie wartości parametru $CN$

Wartość parametru  $CN$  dla obszaru pokrytego płytkimi łąkami piaszczystymi (grupa glebowa C), na których uprawia się ziemniaki (orka wzdłuż warstwic), według tab. 3.2.1 wynosi 82, natomiast wartość parametru  $CN$  dla obszaru pokrytego utworami piaszczystymi (grupa glebowa A) i porośniętego łąkami równa się 30.

Teren zlewni jest zróżnicowany pod względem rodzaju gleb i użytkowania. W takiej sytuacji, wartość parametru  $CN$  dla całej zlewni jest średnią ważoną obliczaną według wzoru:

$$CN = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i CN_i$$

gdzie:

$A$  – całkowite pole powierzchni zlewni [km<sup>2</sup>],

$A_i$  – pole powierzchni obszaru jednorodnego pod względem wartości współczynnika  $CN$  [km<sup>2</sup>],

$CN_i$  – wartość współczynnika  $CN$  dla obszarów jednorodnych  $A_i$ ,

$n$  – liczba obszarów jednorodnych.

$$A_1 = 150 \cdot 0,6 = 90 \text{ [km}^2\text{]}$$

$$A_2 = 150 \cdot 0,4 = 60 \text{ [km}^2\text{]}$$

$$CN_1 = 82$$

$$CN_2 = 30$$

$$CN = \frac{1}{150} (90 \cdot 82 + 60 \cdot 30) = 61,2$$

2. Wyznaczenie potencjalnej retencji zlewni  $R$ 

Potencjalną retencję zlewni wyznacza się według wzoru (3.2.1).

$$R = 25,4 \left( \frac{1000}{61,2} - 10 \right) \approx 25,4 \cdot 6 \approx 152 \text{ [mm]}$$

3. Wyznaczenie strat początkowych  $S_p$ 

Straty początkowe opadu  $S_p$  wyznacza się według wzoru (3.2.2). Wcześniej należy jednak wyznaczyć empiryczny współczynnik  $\mu$  zależny od parametru  $CN$  (tab. 3.2.4). Dla wartości  $CN = 61,2$  wynosi on 0,075, czyli:

$$S_p = 0,075 \cdot 152 = 12 \text{ [mm]}$$

4. Wyznaczenie skumulowanego opadu efektywnego  $P_e(t)$ 

Skumulowany opad efektywny  $P_e(t)$  określa się według wzoru (3.2.5). Wcześniej należy obliczyć wartość skumulowanego opadu całkowitego  $P(7)$ , tj. ilość opadu, która spadła od momentu początkowego do chwili ( $t$ ), czyli w ciągu siedmiu godzin.

$$P(7) = 4 + 3 + 6 + 3 + 4 + 7 + 6 = 33 \text{ [mm]}$$

Opad skumulowany  $P(7)$  jest większy od strat początkowych ( $33 > 12$ ), można więc zastosować wzór (3.2.5):

$$P_e(7) = \frac{(33-12)^2}{33-12+152} = \frac{441}{173} \approx 2,5 \text{ [mm]}$$

**Odpowiedź**

Skumulowany opad efektywny po siedmiu godzinach opadu wynosił 2,5 mm.

**Zadanie**

Oblicz natężenie opadu efektywnego w siódmej godzinie wystąpienia opadu na podstawie danych w powyższym przykładzie.